入侵植物加拿大一枝黄花在湖北的扩散动态和影响因素研究

焦鑫宇，李嘉谊，杨清玉，龙梅，曾令天，刘志雄*
（长江大学 园艺园林学院，湖北 荆州 434025）

摘要：明确加拿大一枝黄花（*Solidago canadensis*）在湖北省的入侵过程和影响因素能够为其监测和预警提供科学依据。该文结合相关报道和实地踏查搜集加拿大一枝黄花的入侵分布点，借助 ArcGIS 对其历史分布动态进行模拟重建，利用 MaxEnt 模型对其扩散动态和影响因素进行分析。结果表明：（1）加拿大一枝黄花在湖北呈不连续聚集分布，由早期的“跳跃式”入侵演变为由东向西北“渐进式”扩散，其中武汉、咸宁和宜昌中部地区入侵程度最为严重；（2）人类活动是影响加拿大一枝黄花扩散的主要因素，其主要沿着公路、铁路等交通方式实现远距离传播，入侵分布点数量与人类活动强度和路网密度呈正相关；（3）最干季度降水量（Bio_17）、气温季节性变动系数（Bio_4）、最湿季度平均温度（Bio_8）、土壤的酸碱度（t_pH）、有机碳含量（t_oc）和海拔（DEM）是影响其生长繁殖的关键生态因子。在 pH=4~7.5、t_oc=0.6%~1.12%的酸性或弱碱性土，及 Bio4=880~920、Bio_8＞24 ℃时，加拿大一枝黄花最容易发生入侵，其在湖北省的中、高适生区面积可达 75 200 km^2。综合其在湖北的历史扩散动态和影响因素来看：加拿大一枝黄花的适生区面积和入侵点均呈现由东向西减少的趋势；人类活动是造成其入侵湖北和扩散的主要因素，而自然因子则直接限制其在入侵点的种群大小和发生面积。该研究为加拿大一枝黄花的风险评估、监测预警和防控治理等技术提供了理论支撑。

关键词：加拿大一枝黄花，扩散动态，影响因素，人类活动，入侵机理
中图分类号：Q948　　　　**文献标识码：**A

Spread dynamics and driving factors of alien invasive plant *Solidago canadensis* in Hubei Province

JIAO Xinyu, LI Jiayi, YANG Qingyu, LONG Mei, ZENG Lingtian, LIU Zhixiong*
(*College of Horticulture and Gardening*, *Yangtze University*, Jingzhou 434025, Hubei, China)

Abstract：*Solidago canadensis* originated from North America, has become a notorious alien invasive plant widely distributed in China, which cause huge agricultural economic losses and serious ecological environment problems. Understanding the invasive process and driving factors of *S. canadensis*. in Hubei Province can help to make a scientific decision for invasion monitoring and early warning. Combining with investigation, previous studies, news and media reports to collect the distribution sites of *S. canadensis*, the historical distribution dynamics of *S. canadensis* was simulated and reconstructed by the ArcGIS in Hubei Province. Moreover, the spread

基金项目：国家自然科学基金（31101202）[Supported by the National Natural Science Foundation of China（31101202）]。
第一作者：焦鑫宇(1997 -)，硕士，从事风景园林植物研究，(E-mail) 942615293@qq.com。
***通信作者：**刘志雄，博士，教授，研究方向为园林植物，(E-mail) zxliu@yangtzeu.edu.cn。

dynamics and its driving factors were analyzed by MaxEnt model. The results were as follows: (1) *S. canadensis* show discontinuous aggregation distribution in Hubei Province. The early "jumping" invasion has gradually transformed into the "gradual" spread from east to northwest Hubei in recent years. The Wuhan, Xianning and the central area of Yichang displayed the most serious invasion. (2) Human activities are the main factors promoting the spread of *S. canadensis*. It can move far away through transport along the road and railway. In addition, the invasive distribution sites of *S. canadensis* were positively correlated with human activities intensity and road network density in Hubei Province. (3) The precipitation of driest quarter (Bio_17), temperature seasonality (Bio_4), mean temperature of wettest quarter (Bio_8), the t_pH value of the soil and the elevation are key ecological factors affecting the propagation of *S. canadensis. S. canadensis* invades easily with the t_pH 4−7.5, the t_oc 0.6%−1.12%, the Bio_4 value 880−920 and the Bio_8 more than 24 ℃. Moreover, the potential distribution areas suitable for medium and high adaptive growth of *S. canadensis* could reach up to 75 200 km^2. Combined with historical spread dynamics and affecting factors of *S. canadensis* invasion, the adaptive areas and invasive distribution sites have tended to reduce from east to west in Hubei Province, and the human activities is a major factor resulted in its invasion and distribution. Moreover, natural factors directly limit its population size and potential distribution areas at the invasion site in Hubei Province. This research provides theoretical support for risk assessment, monitoring and early warning, and prevention and control technologies of *S. canadensis.*

Keywords: *Solidago canadensis*, spread dynamics, driving factors, human activities, invasive mechanism

生物入侵指某一物种通过自然或人为的途径传播到新环境，能够定殖繁衍并对入侵地点带来经济损失或者生态影响的现象（Gioria et al., 2023）。目前，我国的外来入侵物种已达到 700 多种，呈现入侵范围广、入侵危害严重的特点（王伟，2022）。

加拿大一枝黄花（*Solidago canadensis*）是菊科（Asteraceae）一枝黄花属（*Solidago*）多年生草本植物，原产于北美洲，1935 年作为观赏植物引入我国，后逸生成杂草，有"黄花开处百花杀"之称，因此被列入《中国外来入侵物种名单》（第二批）（强胜和张欢，2022）。由于其繁殖和传播能力强，具有强大的的竞争优势，目前已扩散至上海、安徽、浙江、江苏、云南、湖北和台湾等地，对入侵地的农林生产和生态系统危害严重，已成为恶性入侵物种之一（綦顺英等，2022）。因此，开展加拿大一枝黄花的防治工作迫在眉睫。前人已从加拿大一枝黄花的繁殖特性（Cheng et al., 2021）、遗传多样性（Alexander et al., 2009）、与本土植物间的化感作用（Congyan et al., 2016）和对气候变化的响应（Bao et al., 2022）等方面探讨其入侵特性；李丽鹤等（2017）也对其在安徽、江苏、浙江和上海华东 3 省 1 市的入侵风险区进行预测。但要做好加拿大一枝黄花的预警监测和防治工作，仍有许多问题亟需解决：如长序列时间上其持续性的历史动态扩散追踪；其在典型性、代表性的中小尺度区域上如何扩散；以及量化人类活动、道路类型和路网密度对其扩散的影响。

湖北省地处我国中部，气候温暖湿润。作为长江经济带和中部地区崛起带的交汇点，对外交流频繁。构建典型性区域的风险评估系统可以更加明确的反应生态系统和分类群的特殊性（李惠茹等，2022），对于其他外来植物在相类似的地理气候条件下的入侵与扩散的研究具有重要的启发意义。近年来，加拿大一枝黄花在湖北快速扩散，危害了当地的生态安全、粮食安全，因此有必要尽快开展对加拿大一枝黄花在湖北省的防治工作，但关于其入侵起源、扩散方式及影响因素等尚不明晰。构建完整、准确的分布数据库，有助于制订科学有效的防控技术措施，降低其危害。

MaxEnt 是一种基于最大熵算法的物种分布模型，它能够在较少的样本数据中对未知的概率分布做出精确、稳定的推论（Phillips et al., 2006），在量化环境因子对入侵物种分布的影响、预测其潜在适生区等方面广泛应用，能够为入侵植物的风险区规划提供借鉴。前人对于入侵植物适生区的研究多集中于气候变化对其潜在分布的影响，很少将人类活动纳入其潜在分布区的预测模型中（李惠茹等，2022）。然而，人类活动作为影响入侵植物扩散的重要因素，将其纳入模型有助于提高预测结果的科学性。基于此，本文运用 ArcGIS 平台和 MaxEnt 最大熵模型，重建加拿大一枝黄花在湖北省的历史扩散动态、预测其潜在的适生区。综合考虑了生物气候变量、地形、土壤因素、人类活动（人类土地利用、基础设施建设、人口密度、NOAA 夜间灯光数据、公路、铁路等数据层归一化得到的数据层）等多类型资源耦合对加拿大一枝黄花的扩散影响。旨在探讨加拿大一枝黄花在湖北的历史扩散动态和入侵机理，明晰道路系统及人类活动等非生物因素、关键生物因素对其分布的影响，以期为加拿大一枝黄花的预警监测、风险评估和防治提供有力的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

湖北省地处长江中下游平原，位于 108°10′—116°20′ E、29°0′—33°20′ N，地形地貌多样。省内多数地区属亚热带季风气候，无霜期达 230~300 d，为植物生长提供了有利条件。作为长江经济带和中部崛起带的交汇点，湖北省承担着与“一带一路”沿线国家合作的枢纽作用。至 2021 年末，交通里程达 296 921.76 km，城镇化率为 64.09%（刘成杰等，2022）。

1.2 数据来源

1.2.1 数据收集与整理

通过对中国植物数字标本馆（https://www.cvh.ac.cn/）、全球多样性生物平台（https://www.gbif.org/zh/）及其他相关文献进行清查（Feng et al., 2011; 俞红著，2014; Chen et al., 2021）；根据新闻报道、访问（街头随机、电话访问市民、村民和农林业技术人员等），并结合实地踏查（2022 年 5 月—2022 年 8 月），确定其分布点和发生面积。共获分布点

246 个，利用 ArcGIS 中的“缓冲区”工具剔除空间自相关的点，保留 224 个点位。

1.2.2 环境变量来源

选取生物气候变量、地形、土壤、人类活动及交通密度等因子作为环境变量。生物气候变量来自 Worldclim（https://worldclim.org.）；高程数据（SRT DEM）来自于地理空间数据云（www.gscloud.cn/search）；土壤数据来自于世界土壤数据库（https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/）；人类活动足迹数据来源于国际地球科学信息中心（Center for International Earth Science Information Network (ciesin.org)），2004—2022 年交通路网数据来源于国家地理基础数据网（http://www.ngcc.cn/ngcc/html/1/391/392/16114.html）及高德地图（https://ditu.amap.com/）；铁路货运量数据来源于国家统计局发布的中国城市统计年鉴（http://www.stats.gov.cn/）。

表 1 环境变量名称及描述

Table 1 Environment variable names and descriptions

环境变量 Environment variable	描述 Description	环境变量 Environment variable	描述 Description
Bio_1	年平均温度 Annual mean	Bio_19	最冷季度降水量

	temperature (℃)		Precipitation of coldest quarter (mm)
Bio_2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range (Mean of monthly (max temp-min temp)) (℃)	t_bulk	土壤容重 Soil volumetric density (Kg·dm^{-3})
Bio_3	等温性 Isothermality (Bio2/Bio7) (×100) (℃)	t_clay	黏土含量 Clay content (%weight)
Bio_4	气温季节性变动系数 Temperature seasonality (standard deviation ×100) (Cof V)	t_pH	土壤酸碱度 Soil pH [-log (H^{+})]
Bio_5	最暖月的最高气温 Max temperature of warmest month (℃)	t_gravel	碎石体积百分比 Percentage of gravel volume (%vol)
Bio_6	最冷月最低气温 Min temperature of coldest month (℃)	t_sand	含沙量 Sand content (%wt)
Bio_7	气温年较差 Temperature annual range (Bio_5-Bio_6) (℃)	t_silt	淤泥含量 Sludge content (%wt)
Bio_8	最湿季度平均气温 Mean temperature of wettest quarter (℃)	t_oc	土壤表层有机碳含量 Soil surface organic carbon content (%weight)
Bio_9	最干旱季平均气温 Mean temperature of driest quarter (℃)	t_bs	土壤基本饱和度 Basic soil saturation (%)
Bio_10	最暖季度平均气温 Mean temperature of warmest quarter (℃)	t_$CaCO_3$	碳酸盐或石灰岩含量 Carbonate or limestone

			content (%)
Bio_11	最冷季度平均气温 Mean temperature of coldest quarter (℃)	Human footprint	人类活动足迹 Human footprint
Bio_12	年降水量 Annual precipitation (mm)	DEM	海拔 Elevation (m)
Bio_13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month (mm)	Slope	坡度 Slope (°)
Bio_14	最干旱月降水量 Precipitation of driest month (mm)	Aspect	坡向 Aspect
Bio_15	降水季节性 Precipitation seasonality (Coefficient of variation)		
Bio_16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter (mm)		
Bio_17	最干旱季度降水量 Precipitation of driest quarter (mm)		
Bio_18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter (mm)		

1.3 分析步骤

1.3.1 加拿大一枝黄花入侵过程的历史扩散动态

自 2004 年起，以湖北各市为空间单元，3 年为时间切片，绘制历史扩散分布图。

1.3.2 影响加拿大一枝黄花入侵分布的关键环境因子筛选

利用 MaxEnt 最大熵模型对加拿大一枝黄花分布点的数据进行分析，以 75%的“分布点”作为训练子集，以 25%的“分布点”作为验证子集。第一次将“人类活动足迹”和其他生态因子共同作为环境变量进行模型的构建，第二次将“人类活动足迹”剔除，仅保留其他生态因子作为环境变量进行构建，并利用受试者工作特征曲线（ROC 曲线）对 MaxEnt 模型精度进行评估，以 ROC 曲线下面积的 AUC 值做评价标准，AUC 值在 0.5~0.7 时模型可信度较低；0.7~0.85 时可信度一般；0.85~0.95 时效果很好；越趋近于 1 说明模型精度越高，预测结果越可信（Phillips et al., 2006）。将两次 MaxEnt 模型预测的结果以“.asc”的格式保存，利用 SDMtoolbox 工具中的“Distrubution changes between binary SDMs”对两次结果进行比较，得到人类活动对其分布的影响。同时，利用 Jacknife 刀切法以及主成分分析对其他生态因子进行分析，得到影响加拿大一枝黄花分布的关键因子。在建模过程中，为了避免变量之间存在自相关性，利用皮尔森相关性分析，剔除了两个变量中$|r|\geq0.8$的因子，对气候变量和土壤变量进行了预处理（Yang et al., 2013）。

借助 ArcGIS 中“Extract values to points”工具对加拿大一枝黄花入侵分布点的“公路等级”（Lemke et al., 2021）、“运营时间”及“与铁路路基距离”（Szilassi et al., 2021）等 10 个因素进行提取，建立回归方程，探究分布格局与道路之间的关系。

1.3.3 加拿大一枝黄花的适生区评估

借助 ArcGIS10.8.2 将预测结果进行可视化处理，以“自然断点法”为重分类依据，将其划分为非适生区（0~0.125）、低适生区（0.126~0.291）、中适生区（0.291~0.537）和高适生区（0.537~0.968）4 个等级。

2 结果与分析

2.1 加拿大一枝黄花的历史扩散动态

2004 年仅发现加拿大一枝黄花在武汉市沿着铁路零星分布（图 1：A）；至 2007 年，蔓延之势加重，武汉市除江夏区、新洲区外，其他区均发现加拿大一枝黄花；同年在恩施市清河纺织厂院内、巴东县水布垭坝址附近首次发现加拿大一枝黄花（图 1：B）；随着高速公路的新增和道路的扩建，2010 年荆州、荆门和天门等地（图 1：C），2013-2016 年的黄石、黄冈和随州开始有加拿大一枝黄花入侵的报道（图 1：D-E）；随着高速公路的全覆盖，各县市之间的公路形成双道联通，至 2019 年，除潜江市外，湖北几乎各县市都有加拿大一枝黄花入侵的报道（图 1：F-G）。在交通网络密度大的区域以及边界城市，其更容易发生入侵（图 1：H）。加拿大一枝黄花在湖北省的入侵路线大致为：武汉为最初入侵点，鄂、湘、渝交汇的恩施是第 2 个入侵点，随后沿着汉宜铁路与公路向中部地区（荆州、荆门和天门）扩散，并沿着公路、铁路向鄂西北扩散。

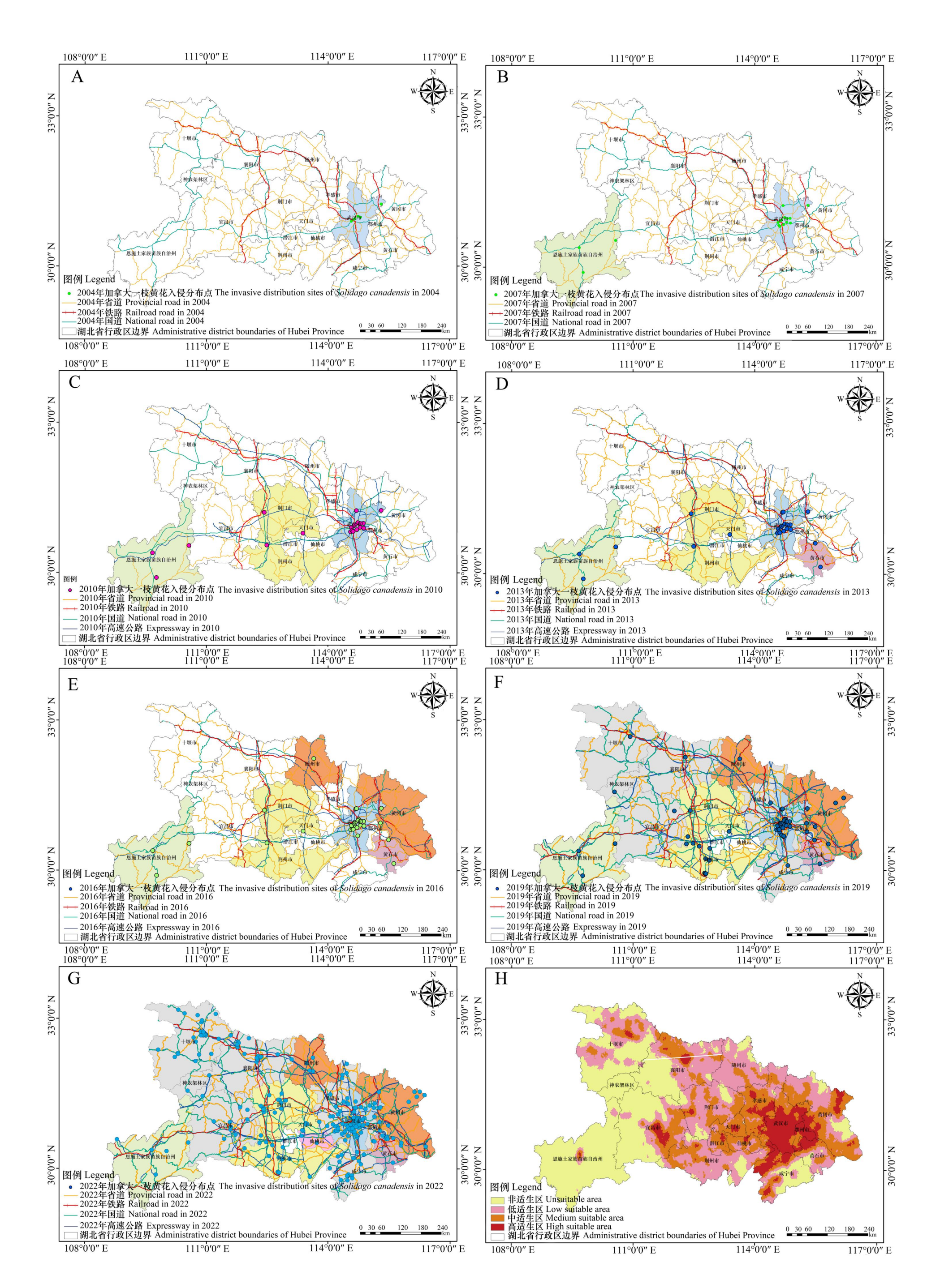


图 1　加拿大一枝黄花在湖北省的历史分布图

Fig.1　The chart of the historical distribution of *Solidago canadensis* in Hubei Province

2.2 加拿大一枝黄花入侵机制探究

2.2.1 加拿大一枝黄花与道路类型及交通的关系

加拿大一枝黄花多沿道路分布，并沿“京广铁路”、“汉宜客运专线”、“汉丹铁路”和“襄渝铁路”蔓延。通过二元 logistic 回归方程进一步分析：加拿大一枝黄花的分布与公路铺装与否、离道路远近（表 2）、铁路货运量、行政区内铁路里程和离铁路路基远近（表 3）具有较强的相关性。同时，硬质铺装公路沿线发现的分布点占 80.2%，约 59.1%的分布区域距铁路路基不超过 1 500 m，随着与道路相距的间距增大，入侵分布点逐渐减少（图 2：a，b）；但随着货运量和行政区内铁路里程的增加，入侵分布点增多（图 2：c）。

表 2　公路与加拿大一枝黄花分布模型

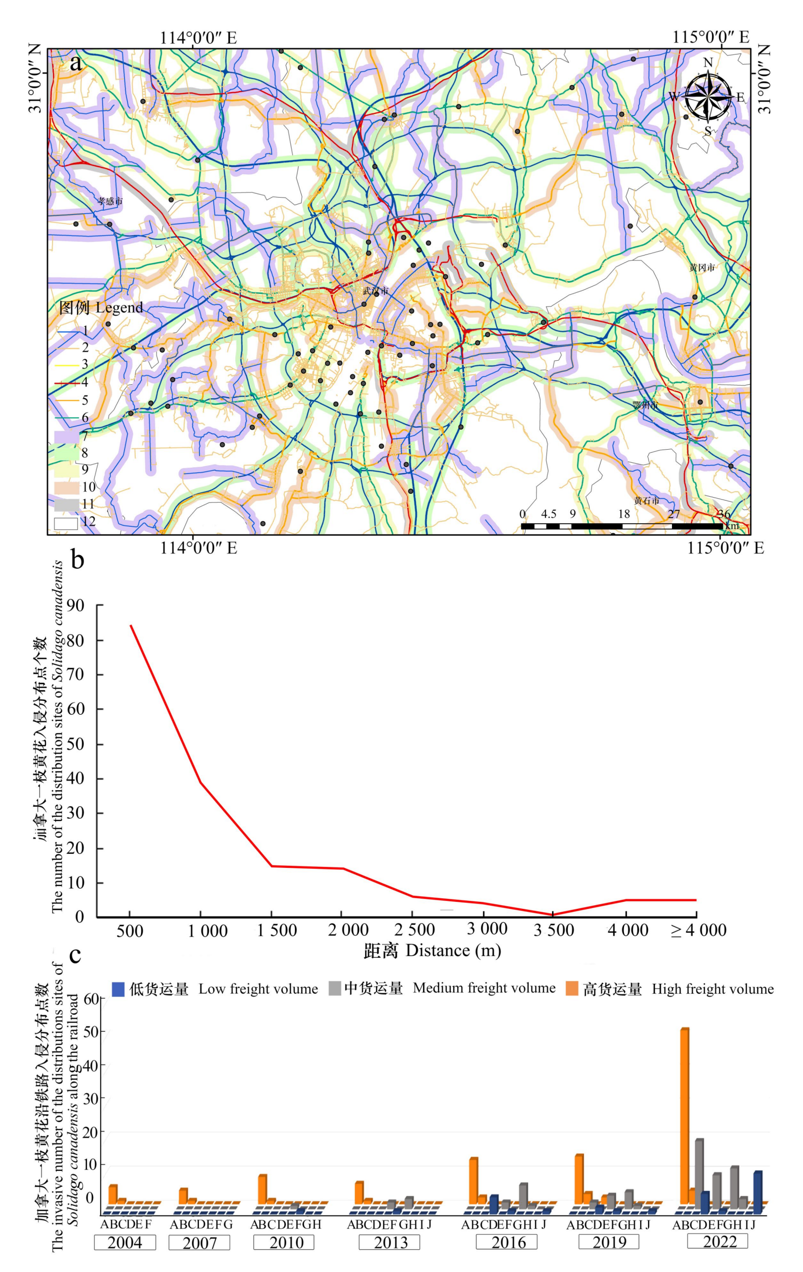
Table 2 Model for analysing the relationship between road and the distribution of *Solidago canadensis*

方程中的变量 Variables in an equation		B	标准误差 Standard error	瓦尔德 Wald	自由度 Degree of freedom	显著性 Statistical significance	Exp(B)
步骤 1 Step 1	公路宽度 Road width	-0.001	0.002	0.066	1	0.797	0.999
	是否铺装 Paved or not	-3.128	0.594	27.741	1	<0.001	0.044
	与道路距离 Distance from the road	0.001	0.001	0.707	1	0.040	1.001
	公路等级 Road grade	-0.113	0.345	0.107	1	0.744	0.893

表 3 铁路与加拿大一枝黄花分布模型

Table 3 Model for analysing the relationship between railway and the distribution of *Solidago canadensis*

方程中的变量 Variables in an equation		B	标准误差 Standard error	瓦尔德 Wald	自由度 Degree of freedom	显著性 Statistical significance	Exp(B)
步骤 1 Step1	铁路数量 Number of railways	-1.927	1.454	1.757	1	0.185	0.146
	铁路等级 Railways grade	-19.138	4.019	<0.001	1	1	<0.001
	货运量是否增加 Freight volumes have increased or not	-3.824	1.443	7.025	1	0.008	0.022
	行政区内铁路里程 Railway mileage within the borough	0.052	0.023	4.918	1	0.027	1.053
	运营时间 Operating hours	0.05	0.064	0.619	1	0.431	1.051
	与铁路路基距离 Distance from railway	0.001	0.001	0.131	1	0.018	1.001



a：**1**．县道；**2**．乡镇村道；**3**．省道；**4**．铁路；**5**．国道；**6**．高速公路；**7**．县道 1 000 m 缓冲区；**8**．高速公路 1 000 m 缓冲区；**9**．国道 1 000 m 缓冲区；**10**．省道 1 000 m 缓冲区；**11**．铁路 1 000 m 缓冲区；**12**．湖北省行政区边界。**A**．京广铁路；**B**．京九铁路；**C**．襄渝铁路；**D**．汉丹铁路；**E**．焦柳铁路；**F**．长荆铁路；**G**．武九铁路；**H**．宜万铁路；**I**．渝利铁路；**J**．汉宜客运专线。

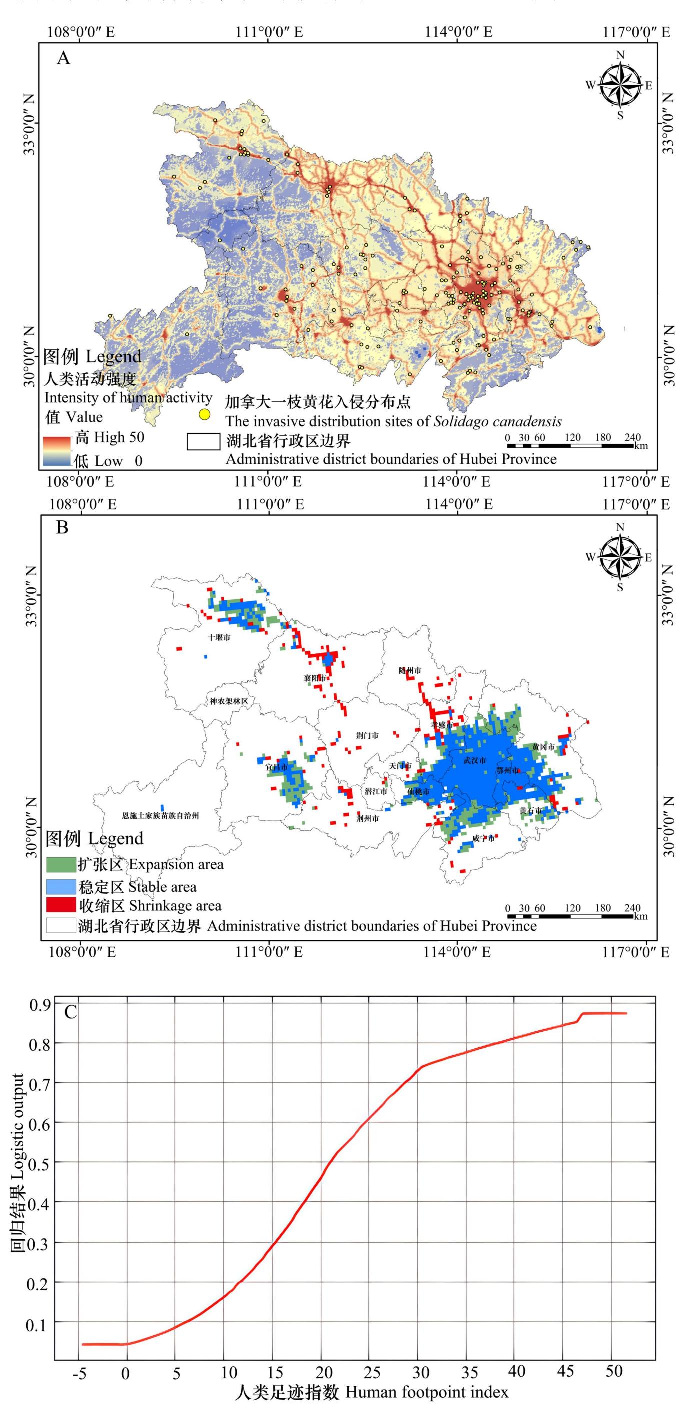
a: **1**. County road; **2**. Township and village road; **3**. Provincial road; **4**. Railroad; **5**. National road; **6**. Expressway; **7**. County road 1 000 meters buffer zone; **8**. Expressway 1 000 meters buffer zone; **9**. National road 1 000 meters buffer zone; **10**. Provincial road 1 000 meters buffer zone; **11**. Railroad 1 000 meters buffer zone; **12**. Administrative district boundaries of Hubei Province. **A**. Beijing-Guangzhou railway; **B**. Beijing-Kowloon railway; **C**. Xiang-Chongqing railway; **D**. Wuhan-Danjiangkou railway; **E**. Jiaozuo-Liuzhou railway; **F**. Changjing railway; **G**. Wuhan-Jiujiang railway; **H**. Yichang-Wanzhou railway; **I**. Chongqing-Lichuan railway; **J**. Wuhan-Yichang railway.

图 2　道路交通分析图

Fig.2　The analytical chart of the roads and the traffic

2.2.2 加拿大一枝黄花与人类活动的关系

将“人类足迹”作为环境变量，运用 ArcGIS 和 MaxEnt 进行处理。结果发现，在人类活动频繁的地区，入侵程度较高（如武汉市），而受人类活动干扰较少的地方（如神农架林区），入侵程度较低（图 3：A，B）。在人类活动影响下，加拿大一枝黄花的中、高适生区面积约为 75 200 km²，占湖北省 40.44%，相较于无人类活动干扰时面积增加了 0.57%。其中黄冈的红安县和麻城市，咸宁的咸安区和赤壁市，宜昌的宜都市和枝江市，十堰的丹江口市等地的适生区相较于无人类活动干扰时扩张了 9 600 km²（图 3：C）。



A. 人类活动干扰下的加拿大一枝黄花入侵分布点；**B**. 人类活动干扰下加拿大一枝黄花适宜生境的空间变化；**C**. 加拿大一枝黄花对人类足迹指数的相应曲线。

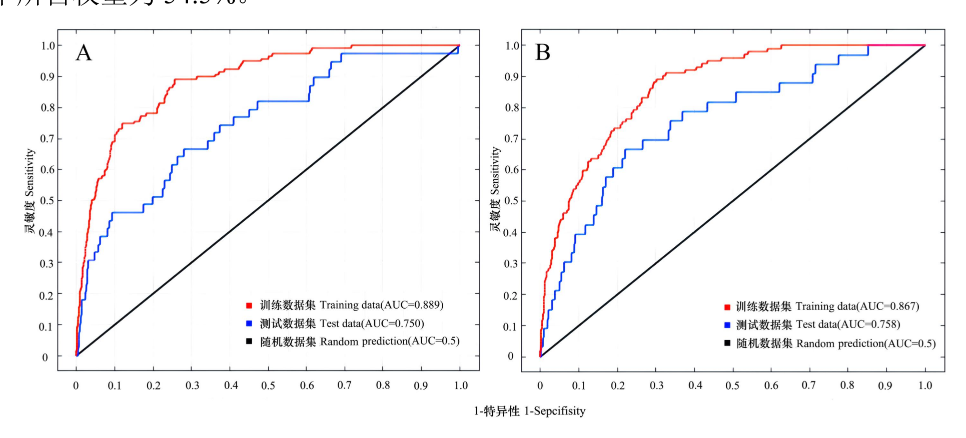
A. The invasive distribution sites of *S. canadensis* affected by human activity; **B**. The spatial changes about suitable habitat of *S. canadensis* affected by human activity; **C**. The response of *S. canadensis* to human footprint

index.

图 3　人类活动对加拿大一枝黄花入侵分布的影响

Fig.3　The invasive distribution of *Solidago canadensis* affected by human activity

ROC 曲线验证人类活动与其地理分布表明：有人类活动干扰下训练集的 AUC 值为 0.889（图 4：A），无人类活动干扰的训练集 AUC 值为 0.867（图 4：B），均处于 0.8~1.0 之间，表明模型结果可信。对比发现，有人类活动干扰下的 AUC 值大于无人类活动干扰的 AUC 值，说明加入“人类活动”能够提高模型结果的准确度，表明人类活动强度对加拿大一枝黄花的分布具有一定影响。Jacknife 分析结果表明，人类活动在影响其扩散分布的因素中所占权重为 54.5%。



A. 有人类活动干扰；**B**. 无人类活动干扰。

A. With human activities; **B**. No human activities.

图 4　ROC 曲线结果

Fig.4　Results of ROC curve

2.2.3 影响加拿大一枝黄花在湖北省分布的关键环境因子

对 19 个生物气候变量进行皮尔森相关性分析（图 5：A）的基础上，剔除$|r|\geq0.8$ 且贡献率较低的因子，最终保留 Bio_4、Bio_5、Bio_7、Bio_8、Bio_15、Bio_17 和 Bio_18 共 7 个气候变量，t_gravel、t_silt、t_pH、t_sand、t_clay、t_oc 和 t_bulk 共 7 个土壤因子，以及海拔、坡度和坡向 3 个地形因子。将筛选后的 7 个气候因子与加拿大一枝黄花在省内分布的 224 个分布点的经纬度进行 RDA 分析，结果表明（图 5：B）：经度（*X*）与 Bio_4、Bio_5、Bio_7、Bio_8、Bio_17、Bio_18 呈正相关关系，并与 Bio4 的正相关性最显著；纬度（*Y*）与 Bio_4、Bio_7、Bio_8 呈正相关，与 Bio_5、Bio_17、Bio_18 呈负相关。

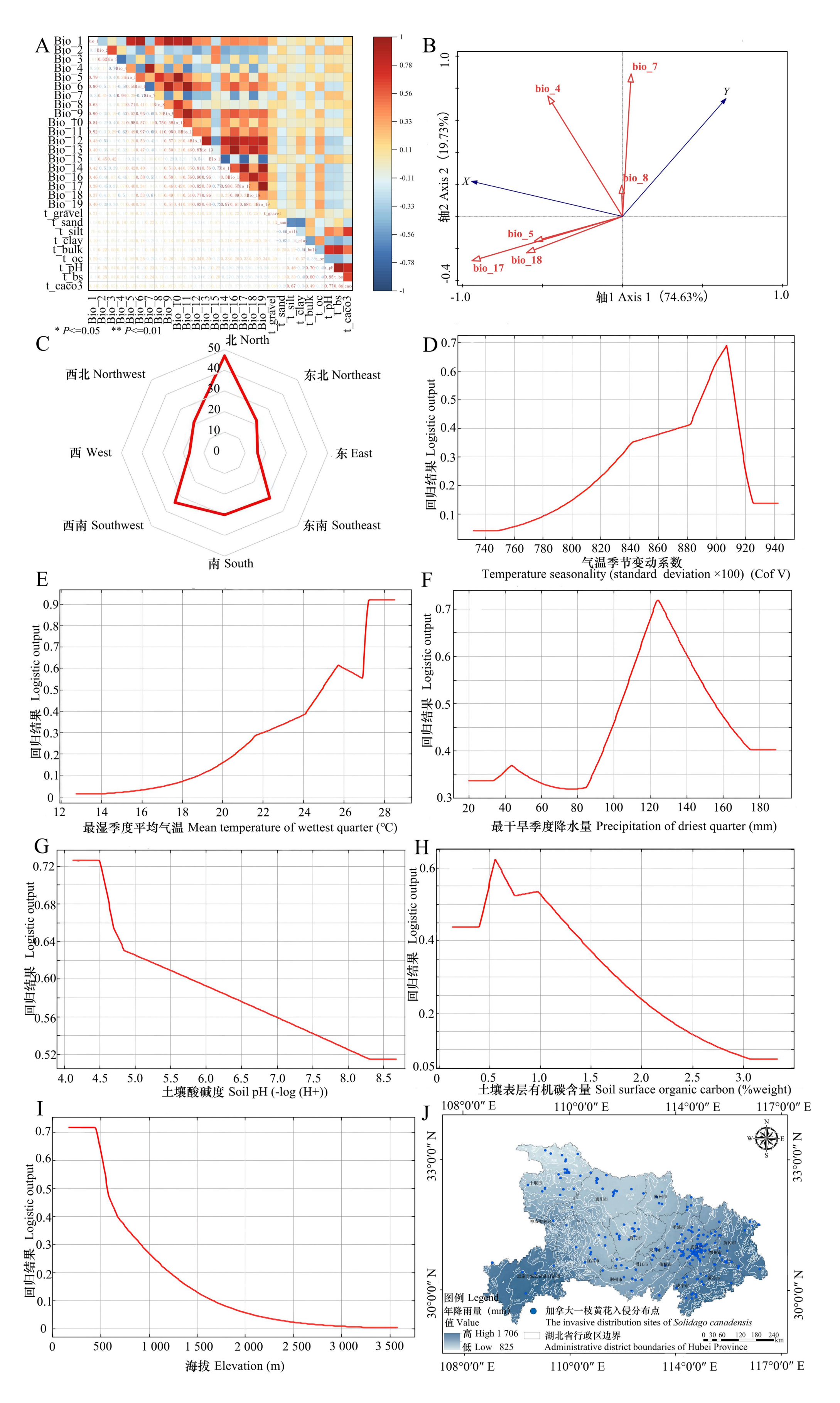
对个 17 环境因子进行主成分分析，结果表明（表 4）：Bio_4、Bio_8 和 Bio_17、DEM、t_pH 和 t_oc 等 6 个环境因子是影响加拿大一枝黄花在湖北省分布的关键环境因子。从加拿大一枝黄花对环境因子的响应曲线来看：加拿大一枝黄花分布点的数量会随着海拔的升高逐渐减少，并且多分布于阴坡（图 5：C）。加拿大一枝黄花适宜生长在 pH=4~7.5，顶层有机碳含量（t_oc）约 0.6%~1.12%的酸性或弱碱性土中。当气候季节性变动系数（Bio_4）在 880~920，最湿季度平均温度（Bio_8）大于 24 ℃时，加拿大一枝黄花最容易发生入侵（图 5：D-I）。

表 4 环境因子的得分系数矩阵

Table 4　A matrix of scoring coefficients for environment factors

环境变量	成分 Ingredient					
Environment variable	1	2	3	4	5	6
Bio_4	0.046	-0.194	0.192	0.147	0.481	-0.206

Bio_5	0.105	-0.213	0.014	-0.058	-0.108	0.068
Bio_7	0.114	-0.143	-0.198	-0.092	0.085	-0.289
Bio_8	0.032	-0.071	0.161	-0.086	0.007	0.649
Bio_15	-0.143	0.078	0.170	0.145	0.009	0.057
Bio_17	-0.046	-0.104	0.234	0.222	0.011	-0.226
Bio_18	0.026	-0.025	-0.256	-0.146	0.220	-0.009
DEM	-0.132	0.197	-0.085	0.040	0.044	-0.046
Slope	-0.108	0.185	-0.057	-0.036	0.097	-0.011
Aspect	-0.050	-0.052	0.005	0.057	0.041	0.289
t_gravel	0.065	0.072	-0.008	-0.091	-0.441	0.269
t_sand	-0.079	0.009	0.185	-0.303	-0.043	-0.121
t_silt	0.128	0.097	-0.093	0.227	-0.148	-0.031
t_clay	-0.048	-0.141	-0.158	0.160	0.260	0.224
t_bulk	0.115	0.191	0.085	0.059	0.228	-0.114
t_oc	-0.035	-0.011	-0.177	0.268	-0.226	0.193
t_pH	0.178	0.115	0.088	0.014	0.143	0.073



A. 环境变量的相关性热图；**B**. 加拿大一枝黄花在湖北省的分布与气候因子的冗余分析排序（*X*: 经度；*Y*:

纬度。实心箭头表示因变量经纬度，空心箭头表示自变量气候因子，夹角大小表示相关性强弱；<90° 呈正向相关，>90° 呈负相关，=90° 表示不相关）**C**. 加拿大一枝黄花分布点的坡向；**D**. 加拿大一枝黄花对气温季节性变动系数的响应曲线；**E**. 加拿大一枝黄花对最湿季度平均温度的响应曲线；**F**. 加拿大一枝黄花对最干季度降水量的响应曲线；**G**. 加拿大一枝黄花对土壤酸碱度的响应曲线；**H**. 加拿大一枝黄花对土壤的有机碳含量的响应曲线；**I**. 加拿大一枝黄花对海拔的响应曲线；**J**. 加拿大一枝黄花入侵分布点与年降雨量

A. The correlation heat map of environmental variables; **B**. The redundant analysis between the distribution of *S. canadensis* and climate factors in Hubei Province. (*X*: longitude; *Y*: Latitude. The solid arrow represents the longitude and latitude of the dependent variable, the hollow arrow represents the climate factors of the independent variable, and the size of the angle represents the strength of the correlation; <90° represents positively correlated, >90° represents negatively correlated, and =90° represents uncorrelation); **C**. The aspect of the invasive distribution sites of *S. canadensis*; **D**. Response of *S. canadensis* to the temperature seasonality (standard deviation × 100); **E**. Response of *S. canadensis* to the average temperature of the wettest quarter; **F**. Response of *S. canadensis* to precipitation of driest quarter; **G**. Response of *S. canadensis* to pH; **H**. Response of *S. canadensis* to soil surface organic carbon content; **I**. Response of *S. canadensis* to altitude; **J**. The invasive distribution sites of *S. canadensis* and the annual precipitation.

图 5　环境因子的相关性分析及加拿大一枝黄花对环境因子的响应曲线

Fig.5　The analysis of correlation for environmental factors and response curve of *Solidago canadensis* to environment factors

3 讨论与结论

构建外来植物基础信息数据库是深入研究外来入侵植物风险评估的重要基础，更是科学评估与科学管理的基准指南，利用生态位模型对外来植物的适生区进行分析是风险评估的重要组成部分（Faulkner et al., 2020）。前人对于入侵植物适生区的研究多集中于气候变化对其潜在分布的影响（李惠茹等，2022）。人类活动作为影响入侵植物扩散的重要因素，将其纳入模型的构建有助于增加预测结果的科学性。

3.1 影响加拿大一枝黄花在湖北扩散的主要因素

从加拿大一枝黄花在湖北省历史扩散的动态看，其由开始的零星分布发展到连片式分布，从最初“跳跃式”入侵发展为近期“渐进式”扩散，并呈现鄂东南多而鄂西少的分布格局。2004—2007 年为扩散的时滞期，2007 年后扩散速度提高，2016 年后进入快速扩张期，目前仍未达到饱和期。一方面，加拿大一枝黄花具有极强的繁殖能力和竞争优势，其种子量大、萌发率高，地下根状茎次年可萌蘖成多个独立个体；同时其通过化感作用抑制本土植物的萌发和生长，降低入侵地土壤种子库种子密度，使其在入侵后能够迅速扩散形成单优势种群落（胡文杰等，2019；闫亚楠等，2019；綦顺英等，2022）。另一方面，加拿大一枝黄花可通过多倍化驱动快速提高植株的耐热性和繁殖能力，增强其在亚热带地区的适应性（Lu et al., 2020；Cheng et al., 2021）。前人研究发现，增温和 CO_2 浓度上升驱动外来入侵植物的扩散（Mozdzer & Caplan, 2018）。任光前（2020）研究发现增温和氮沉降交互的协同效应能够促进加拿大一枝黄花的入侵。随着全球气候的变暖，加拿大一枝黄花近年在湖北省分布数量激增、扩散速度加快。前人研究表明，干旱能够在一定程度上阻碍外来植物的入侵（Valliere et al., 2019），葛结林等（2020）发现加拿大一枝黄花的茎生物量与最干季度降水量呈显著负相关，干旱抑制其生长，使其难以形成优势种群。本研究发现加拿大一枝黄花的营养生长期与湖北最湿季度重合，其生物学特性与当地的地理生态条件的耦合为其在湖北定殖提供了有利条件；当最干季度降水量低于 120 mm 时，加拿大一枝黄花难以入侵。陈晓艳等（2022）研究发现，菊科另一入侵植物粗毛牛膝菊

（*Galinsoga quadriradiata*）种群的扩散和繁殖能力随着海拔的升高而下降，本研究发现加拿大一枝黄花的入侵概率同样随着海拔的升高而降低。鄂东南较鄂西海拔低、降水量多，进一步加剧了其在鄂东南多而鄂西少的分布格局。

前人研究发现，人类活动会给生态系统造成一定程度的破坏，增加物种入侵可能性，入侵植物先入侵人类活动频繁、干扰严重、资源丰富的生境，其次入侵自然生境（Md & Santini，2015；Lazzaro et al.，2020）；入侵植物多集中分布于人类活动干扰频繁的区域（张岳等，2022；Dimitrakopoulos et al.，2022）。加拿大一枝黄花同样先入侵人类活动较为频繁的鄂东南地区，而后入侵人类活动干扰较弱的鄂西北地区。塞依丁等（2019）发现，相较于自然环境因子，人类活动对入侵植物黄花刺茄（*Solanum rostratum*）的分布扩散影响更大，能够加速其扩散并增大其适生面积。本研究通过 Jacknife 分析显示，人类活动在影响其扩散分布的因素中所占权重为 54.5%。前人研究表明，入侵植物的分布与城市化有关。越靠近城市中心，入侵植物的数量越多（Murphy et al.，2022；赵云峰等，2022）。资料显示，2004—2007 年湖北省城市化率仅增加了 1.7%，2007—2010 年城市化率增加了 5%以上，特别是 2016 年至今，城镇化率增加约为 6%，湖北城市化率的增速提高促进了加拿大一枝黄花扩散增快。另外，路网密度与入侵植物的分布呈显著正相关，单位面积的交通线路越多，其外来入侵植物物种的密度也越高（王苏铭等，2012；Seenbens，2019）。道路里程能够反应区域交通运输业的发展和受人类活动干扰的大小。随着与道路路基距离的减小，入侵强度逐渐增大（王国欢等，2017；Bhatta et al.，2020）。本研究同样发现，加拿大一枝黄花的分布点数量与公路、铁路的数量以及路网密度有关，随着 2007 年后汉宜铁路和荆宜高速的通车，荆门、荆州和天门等地陆续的发现了加拿大一枝黄花的入侵点；路网密度较大的武汉、咸宁、宜昌入侵程度较为严重；其入侵程度同样与路基距离呈负相关，与货运量和行政区内的铁路里程呈正相关。本研究还发现加拿大一枝黄花的分布与路面铺设与否有具有较强的相关性，硬质铺设道路沿线发现其概率比未铺设道路的概率大，与豚草（*Ambrosia artemisiifolia*）的入侵特性相似（Joly et al.，2011）。一方面，可能由于菊科植物加拿大一枝黄花与豚草种子量大、细小且轻、易粘附在人类衣物或车辆轮胎上且不易被发现，从而通过人类活动实现远距离扩散；另一方面，相较于未铺设的道路，具有硬质铺设的道路上的交通更为便捷，人类活动频率相对高，从而增加了外来物种传播的机会。

3.2 加拿大一枝黄花的预警和防治探讨

加拿大一枝黄花一旦形成入侵，就很难彻底根除，目前主要依靠人工防除、化学防除、生物防除，但防除效果不理想。若要通过“断源、截流、截库”的方法对其源头进行阻断，科学防治，降低其扩散传播风险，政府应给予更多的重视和支持，加强对其扩散动态预警、监测和防控技术研究。结合本研究来看，加拿大一枝黄花容易在 pH=4.5~7.5、t_oc=0.6%~1.12%的酸性或弱碱性土中、最湿季度平均温度（Bio_8）约 28 ℃以及路网密度大的区域发生入侵。一方面，可以对有类似地理气候环境且尚未发生入侵的区域实施动态监测，多关注公路、铁路沿线的生境，强化源头预防，尽量做到早发现、早应对。另一方面，加强重点入侵植物的科普宣传，提高公众的参与度，增强加拿大一枝黄花的防控意识，一旦发生新的小面积的入侵，能识别并及时铲除；并对已严重入侵区域综合治理和多年跟踪，降低其扩散风险。

参考文献：

ALEXANDER JM, POLL M, DIETZ H, et al., 2009. Contrasting patterns of genetic variation and structure in plant invasions of mountains[J]. Divers Distrib, 15(3): 502-512.

BAO XY, WANG ZX, HE ZS, et al., 2022. Enhanced precipitation offsets climate warming inhibition on *Solidago canadensis* growth and sustains its high tolerance[J]. Glob Ecol

Conserv, 34: e02023.

BHATTA S, JOSHI LR, SHRESTHA BB, et al., 2020. Distribution and impact of invasive alien plant species in Bardia national park, western Nepal[J]. Environ Conserv, 47(3): 1-9.

CHEN J, MA FZ, ZHANG YJ, et al., 2021. Spatial distribution patterns of invasive alien species in China[J]. Glob Ecol Conserv, 26: e01432.

CHENG H, WANG S, WEI M, et al., 2021. Reproductive allocation of *Solidago canadens is* L. plays a key role in its invasiveness across a gradient of invasion degrees[J]. Pop ul Ecol, 63(4): 290-301.

CONGYAN, WANG, HONGGUANG, et al., 2016. The allelopathic effects of invasive plant *Solidago canadensis* on seed germination and growth of *Lactuca sativa* enhanced by different types of acid deposition[J]. Ecotoxicology, 25(3): 555-562.

CHENG J, LI J, ZHANG Z, et al., 2021. Autopolyploidy-driven range expansion of a tem perate-originated plant to pan-tropic under global change[J]. Ecol Monogr, 91(2): e01445.

DIMITRAKOPOULOS PG,KOUKOULAS S, MICHELAKI C, et al., 2022. Anthropogenic and environmental determinants of alien plant species spatial distribution on an island s cale[J]. Sci Total Environ, 805:150314-150322.

FENG JM, NAN RY, ZHANG Z, 2011. Plant invasions in China: what can we learn from the checklists of alien invasive plants during 1998-2008?[J]. Adv Mat Res, 25-29.

FRANZ E, SVEN B, BLACKBURN TM, et al., 2015. Crossing frontiers in tackling pathways of biological invasions[J]. Bioscience, 65(8): 769-782.

FAULKNER KT, ROBERSTON MP, WILSON JRU, et al., 2020. Stronger regional biosecurity is essential to prevent hundreds of harmful biological invasions[J]. Glob Chang Biol, 26(4): 2449-2462.

GIORIA M, HULME PE, RICHARDSON DM, et al., 2023. Why are invasive plants succ essful?[J]. Annu Rev Plant Biol, 74(1): 1573-1609.

GE JL, HE JQ, SUN XF, et al., 2010. Ecological responses of the invasive alien plant *solidago canadensis* to changes of soil water content[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 30(3): 575-585. [葛结林，何家庆，孙晓方，等，2010. 入侵植物加拿大一枝黄花对土壤水分变化的生态学响应[J].西北植物学报，30（3）：575-585.]

HU WJ, LIANG QJ, HE YH, et al., 2020. Allelopathy of *Solidago canadensis* with different invasion degrees under nitrogen deposition[J]. Guihaia, 40(11): 1531-1539. [胡文杰，梁秋菊，和昱含，等，2020. 氮沉降对不同入侵程度加拿大一枝黄花化感作用的影响[J].广西植物，40(11)：1531-1539.]

JOLY M, BERTRAND P, GBANGOU RY, et al., 2011. Paving the way for invasive speci es: road type and the spread of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*)[J]. Environ Manag, 48(3): 514-522.

LEMKE A, BUCHHOLZ S, KOWARIK I, et al., 2021. Interaction of traffic intensity and habitat features shape invasion dynamics of an invasive alien species (*Ambrosia artemisiifolia*) in a regional road network[J]. NeoBiota, 64(2): 155-175.

LI LH, LIU HY, LIN ZS, et al., 2017. Identifying priority areas for monitoring the invasion of *Solidago canadensis* based[J]. Acta Ecol Sin, 37(9): 3124-3132. [李丽鹤，刘会玉，林振山，等，2017. 基于 MAXENT 和 ZONATION 的加拿大一枝黄花入侵重点监控区确定[J].生态学报，37(9)：3124-3132.]

LIU CJ, HU YL, LI HQ, et al., 2022. Evaluation of the economic effects of pilot free trade zone policies in the Yangtze river economic belt[J]. J Stat Inf, 37(6): 47-61. [刘成杰，胡钰苓，李虹桥，等，2022. 长江经济带自由贸易试验区试点政策的经济效应评估[J].统计与信息论坛，37(6)：47-61.]

LI HR, YAN J, DU C, et al., 2022. Current status and suggestions of research on invasive risk assessment of alienplants in China[J]. Acta Ecol Sin, 42(16): 6451-6463. [李惠茹，严靖，杜诚，等，2022. 中国外来植物入侵风险评估研究[J].生态学报，42(16)：6451-6463.]

LU H, XUE L, CHENG J, et al., 2020. Polyploidization-driven differentiation of freezing tolerance in *Solidago canadensis*[J]. Plant Cell Environ, 43(6): 1394-1403.

MD MARCO, SANTINI L, 2015. Human pressures predict species' geographic range size better than biological traits[J]. Global Change Biol, 21(6): 2169-2178.

MURPHY SM, VYAS DK,SHER AA, et al.,2022. Light pollution affects invasive and native plant traits important to plant competition and herbivorous insects[J]. Biol Invasions, 24: 599-602.

MOZDZER TJ, CAPLAN JS, 2018. Complementary responses of morphology and physiology enhance the stand-scale production of a model invasive species under elevated CO_2 and nitrogen[J]. Funct Ecol, 32(7): 1784-1796.

PHILLIPS SJ, ANDERSON RP, SCHAPIRE RE, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecol Mod, 190(34): 231-259.

QIANG S, ZHANG H, 2022. Invasion and management of alien plants in agroecosystems in China[J]. J Nanjing Agric Univ, 45(5): 957-980. [强胜，张欢，2022. 中国农业生态系统外来植物入侵及其管理现状[J].南京农业大学学报，45(5)：957-980.]

REN GQ, 2020. Ecological adaptation and mechanisms of invasive species *Solidago canadensis* L. to nitrogen deposition under global warming[D]. Zhenjiang: Jiangsu University. [任光前，2020. 全球变暖背景下入侵植物加拿大一枝黄花对氮沉降的生态适应及其机制[D].镇江：江苏大学.]

SZILASSI P, SOOKY A, BATORI Z, et al., 2021. Natura 2000 Areas, road, railway, water, and ecological networks may provide pathways for biological invasion: a country scale analysis[J]. Plants-Basel, 10(12): 2670.

SEENBENS H. 2019. Invasion ecology: expanding trade and the dispersal of alien species[J]. Curr Biol, 29(4): R120-R122.

SAYIT H, NURBAY A, ARMAN J, et al., 2019. Impact of human activities on potential distribution of *Solanum rostratum* Dunal in Xinjiang[J]. Acta Ecol Sin, 39(2): 629-636. [塞依丁·海米提，努尔巴依·阿布都沙力克，阿尔曼·解思斯，等，2019. 人类活动对外来入侵植物黄花刺茄在新疆潜在分布的影响[J].生态学报，39（2）：629-636.]

VALLIERE JM, ESCOBEDO EB, BUCCIARELLI GM, et al., 2019. Invasive annuals respond more negatively to drought than native species[J]. New Phytol, 223(3): 1647-1656.

WANG W, 2022. Legal Response to Environmental Biosafety[J/OL]. J Agro-Environ Sci:1-10. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20221213.1731.004.html[王伟，2022. 环境生物安全的法治化应对[J/OL].农业环境科学学报：1-10.http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20221213.1731.004.html]

WANG SM, ZHANG N, YU LQ, et al., 2012. Distribution pattern and their influcing factors of invasive alien plants in Beijing[J]. Acta Ecol Sin, 32(15): 4618-4629. [王苏铭，张楠，于琳倩，等，2012. 北京地区外来入侵植物分布特征及其影响因素[J].生态学报，32(15)：4618-4629.]

YANG XQ, KUSHWAHA S, SARAN S, et al., 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, Justicia adhatoda L. in Lesser Himalayan foothills[J]. Ecol Eng, 51: 83-87.

YU H, 2014. The research on alien species invasion in China from the perspective of differences in regional economic development.[M]. Beijing: China business press: 61-66. [俞红，2014. 区域经济差异视角下中国外来物种入侵问题研究 [M]. 北京：中国商务出版社：61-66]

ZHANG Y, ZHANG GL, WANG ZH, et al., 2022. Agricultural alien invasive plants investigation and analysis in Guanling county and Huishui county of Guizhou Province[J]. Chinese J Agrometeorol, 43(9): 704-719. [张岳，张国良，王忠辉，等，2022. 贵州省关岭县和惠水县农业外来入侵植物调查与分析[J]. 中国农业气象，2022，43(9)：704-719.]

QI SY, GONG ZF, YANG YH, et al., 2022. Effects of Solidago canadensis invasion on aboveground vegetation and soil seed banks[J]. J Anhui Agric Univ, 49(3): 476-482. [綦顺英，宫志锋，杨宇航，等，2022. 加拿大一枝黄花入侵对地上植被及土壤种子库的影响[J]. 安徽农业大学学报，49（3）：476-482.]